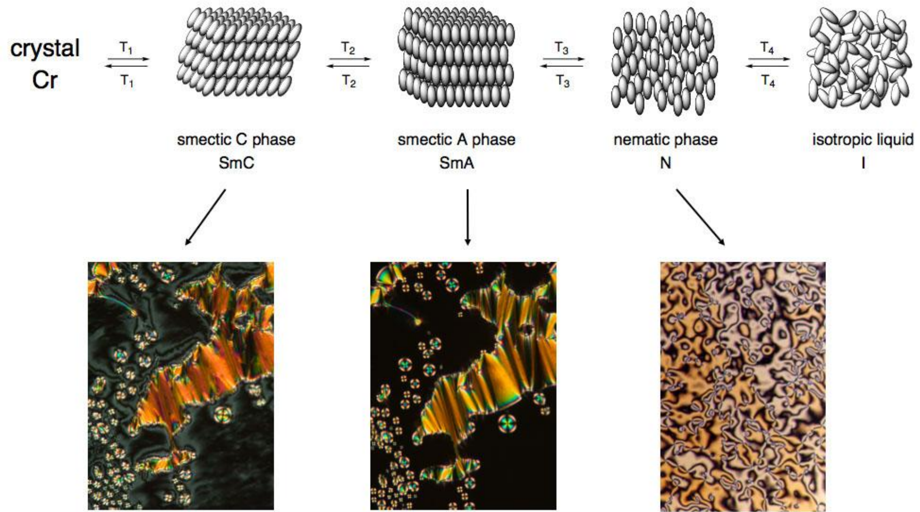
تجارب نترات الأمونيوم

تعريفات أساسية: سنضع هنا بعض التعريفات لتجنب إعادة تعريفها في سياق الكلام عدة مرات

المادة الدافعة Propellant: هي مادة كيميائية تستخدم لتوليد قوة الدفع في المحرك النفاث عن طريق إحداث عملية احتراق. وسنشير إليها دوما باسم الدوافع أو المادة الدافعة.

الدفع النوعي Specific impulse : هي طريقة لوصف كفائة محركات الصواريخ و النفاثات و تختصر عادة بـ Isp ، وكلما زادت قيمة الدفع النوعي زادت كفاءة محرك الدفع.

الطور الكريستالي للمادة Crystalline phase : هي طريقة توزيع الذرات داخل جزئ من المادة، وباختلاف توزيع الذرات تختلف خصائص المادة كما توضح الصورة المبينة المبسطة



الطبيعة الهيجروسكوبية للمادة Hygroscopy: هي قدرة المادة علي امتصاص والاحتفاظ بجزيئات الماء أو بخار الماء من البيئة المحيطة مثل الرطوبة في الجو.

السرعة المِمَيّزِة characteristic velocity (c^*): هي مقياس لكفاءة غرفة احتراق المحرك الصاروخي بدون الفوهة Nozzle. وتستخدم لمقارنة محركات الدفع باستخدام دوافع مختلفة.

تركيبات الدوافع المبنية علي الألومونيوم

المقدمة :

هذه الصفحة تشرح مجموعة من التجارب التي تم إجراؤها علي مدي الخمس سنوات الماضية المتعلقة بتطوير دوافع صواريخ لغير المحترفين مبنية علي نترات الأمونيوم المؤكسِدة ammonium nitrate (AN) oxidizer

أهداف التجارب تتضمن تطوير الدوافع السهلة نسبياً في التصنيع ,والآمنة في التصنيع والتعامل, ومنخفضة التكاليف والتي تستخدم مواد سهل الحصول عليها . بكلمات أخري , المناسبة كدوافع للصواريخ ذات أداء عالي نسبيا للهواة . بالنسبة للأداء فإن هدفنا الحصول علي دفع نوعي للصاروخ بمقدار 200 ثانية.

نترات الأمونيوم(AN): لها العديد من المميزات التي تجعلها مناسبة كمؤكسد دوافع الصواريخ فهي

1- متوافرة ومنخفضة التكلفة مع استهلاك سنوي عالمي يفوق 20 مليون طن كمخصب زراعي

2- وهي ثابتة كميائيا في درجة حرارة الغرفة

3- لا تحترق من تلقاء نفسها ولها حساسية منخفضة جدا للإحتكاك والصدمات

4- ودرجة حرارة تحللها عالية للغاية (200 درجة مئوية) .

نترات الأمونيوم والتي لها التركيب الكميائي (NH_4NO_3) لا تحتوي علي أيونات معدنية وعندما يتم تسخينها تتحول فقط إلي منتجات غازية ,وهذا يساهم في نواتج إحتراق منخفضة الوزن الجزيئي ,والتي هي مرغوبة, بالتالي لاتسبب مايعرف بالتدفق الثنائي two-phase flow وهو ما يزيد نسبة الفاقد من القوة الدافعة الناتجة.

هذه العوامل تزودنا بــدفع نوعي Specific impulse من جيد جدا إلي ممتاز.

ولكن نترات الأمونيوم لها عيبان أحدهما يتعلق بتغيرات في الطور الكريستالي بتغير درجة الحرارة ,فيمتلك خمس تغيرات طورية متمايزة. أحد هذه التغيرات يقع عند درجة حرارة 32 مئوية والمرتبط بزيادة في الحجم بما يقارب 4%.

وبما أن هذه الحرارة يمكن الوصول إليها أثناء التخزين فإن هذا الأمر يجب أن يؤخذ في الإعتبار أثناء التصنيع والتخزين.

وأحيانا يكون التعرض لعدد كبير من التغيرات في الطور الكريستالي للمادة سببا لفساد هيكل ذرات المادة الدافعة وهذا يعتمد علي بعض العوامل التي سنناقشها لاحقا في هذه الفقرة .

العيب الثاني هو الطبيعة الهيجروسكوبية (راجع التعريف بالأعلي) لنترات الأمونيوم، ولكن بما أن الحد الأعلي للرطوبة هو 70% في درجة حرارة الغرفة (في المتوسط) فذلك العيب لايشكل خطرا كبيرا في المادة.

فهم السلوك الكيميائي لنترات الأمونيوم

أحد الخطوات الأولي التي تؤخذ في الاعتبار للتعامل مع التحديات التي قد تواجهنا في تطوير دافع صواريخ عملي و آمن كانت دراسة التقارير التقنية المتعلقة بالسلوك الكيميائي و التحللي لنترات الأمونيوم . لذا فقد تمت دراسة عشرات التقريرات و تم تعلم الكثير من خلال ذلك. مما ساعدنا علي فهم هذه المادة التي رغم شيوعها فلا تزال تبهرنا .

معرفة السلوك الكيميائي و خاصة المتعلق بعملية التحلل لنترات الأمونيوم النقي و كذلك نترات الأمونيوم المحَفزَ مهمة الفهم لمن يقوم بإجراء التجارب. ليس فقط من أجل السلامة و لكن أيضا للسماح بمدخل أكثر عملية للتعامل مع التحديات المتعلقة بالعمل علي تطوير الدوافع.

الاستخدام الأكثر شيوعا لنترات الأمونيوم هو كمخصب زراعي. الشكل الزراعي له هو 0-0-35 و الذي يشير إلي كمية النيتروجين Nitrogen, الفوسفور Phosphorus, البوتاسيوم Potassium(و الذي يعرف ب NPK) المحتواة في المنتج. علي سبيل المثال فإن 8-8-8 تشير إلي أن المخصب يحتوي علي 8% نتروجين أولي (N) , 8%فسفور أولي (P) 8% بوتاسيوم أولي (K) بالوزن. نترات الأمونيوم يحتوي علي صفر في المائة من الفسفور و البوتاسيوم و 35% نتروجين . هذه القيمة الأخيرة يمكن إعادة إنتاجها بمعرفة الكتلة الذرية للنتروجين الأولي المحتَوي في نترات الأمونيوم :

الوزن الجزيئي لــ NH_4NO_3 = 14 + 14 (1) + 3(16)=80 جم/مول

نسبة النتروجين N في NH_4NO_3 = 2(14)/80 = 0.35

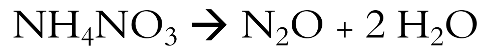
في الظروف العادية , فإن نترات الأمونيوم يكون ثابتا ويمكن تخزينه بكميات كبيرة دون الخوف من الإشتعال الذاتي أو الإحتراق التلقائي.

نترات الأمونيوم شديد الذوبان في الماء, و هذا الأمر يتزايد أُسيا (أي علي شكل دالة أُسية) مع زيادة الحرارة. عندما يذوب في الماء فإن الحرارة يتم امتصاصها بمعدل حوالي 79 كالوري/جم في درجة حرارة الغرفة. هذه الخاصية يتم استغلالها في عبوات التبريد الفوري التي تباع في الصيدليات لتخفيف آلام الجروح.

أحد التحديات الهامة التي يجب التغلب عليها لاستخدام نترات الأمونيوم كمؤكسد في الدوافع هو التعامل مع ميله الطبيعي للإنطفاء الذاتي. هذا الميل هو نتيجة للكمية الهائلة من الماء التي تنتج بتحلله. و التي تبطئ من عملية الإحتراق (معدل الإحتراق) إلي الدرجة التي تجعل الإحتراق غير ممكن الإستمرار.

بالرغم من عدم قابلية التطبيق في الدافع الذي نقوم بعمله, فإنه من الممتع دراسة ما الذي يحدث عندما يتم تسخين عينة من نترات الأمونيوم.

عند تسخين نترات الأمونيوم النقي إلي حرارة تتراوح من 169 إلي 200 درجة مئوية في البداية لايحدث أي تحلل و لكن عندما تصل الحرارة إلي ما بين 200 إلي 250 درجة مئوية يبدأ التفاعل الطارد للحرارة الآتي في الحدوث :



$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2O + 2\,H_2O$$

ويكون معدل فقد الطاقة هو delta H= -8.8 kcal/mol

من المعادلة السابقة يتضح أنه لكل 100 جرام من نترات الأمونيوم , ينتج عندنا 45 جرام من الماء و يكون ال55 جراما الباقين أكسيد نتروجين غازي و هذا التفاعل يطلق حرارة بكمية 110 كالوري/ جم .

بالتزامن مع هذا التفاعل يحدث تفاعل آخر, يحدث تفاعل منفصل ماص للحرارة وفيه يتحلل نترات الأمونيوم إلي أمونيا و حمض نتريك :



$$NH_4NO_3 \rightarrow NH_3 + HNO_3$$

وتكون الطاقة الناتجة delta H= +44.6 kcal/mol

إتحاد هذين المؤثرين ينتج عنه حرارة في حالة ثابتة, عملية التحلل هذه تتم عن طريق منتجات التفاعل الغازية التى يتم السماح لها بالهرب (و خصوصاHNO_3). لذا فلو تم تسخين نترات الأمونيوم نقى بمعدل معتدل فى الهواء المفتوح بدون حبس confinement فلا يمكن للحرارة أن ترتفع كثيرا فوق نقطة الذوبان.

تحت ظروف الحالة الثابتة, يقوم الإنحلال الماص للحرارة لنترات الأمونيوم إلي غازي النشادر NH_3 و HNO_3 بامتصاص كل الحرارة الناتجة عن الانحلال, لذا فعندما تضاف الحرارة إلي نترات الأمونيوم في الضغط الجوي العادي و حتي لو كانت هذه الحرارة من مصدر عالي الحرارة جدا, فإن حرارة نترات الأمونيوم تكون محدودة بتفككه dissociation لقيم تكون عندها معدلات التحلل قليلة نسبيا. و مع ذلك فإنه عند رفع الضغط يتم قمع تفاعل التفكك ويتسارع التحلل.

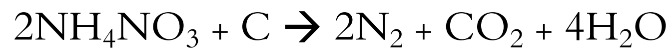
عند تسخين نترات الأمونيوم بسرعة شديدة, كما يمكن أن يحدث في محرك الصاروخ , عملية التحلل تكون مختلفة بطريقة ملحوظة عن الأصلية. تحت هذه الظروف فإن التحلل هو أساسا هذا التفاعل التفككي, مع NH_3 و HNO_3 كنواتج.

بعض المواد لها تأثير محفز علي نترات الأمونيوم مثل الماء و الكلوريدات و الكرومات. وجود ولو أقل كمية من الماء يجعل التحلل يبدأعند 180 مئوية. الأمونيا و المواد القاعدية كاليوريا لها تأثير مثبط للتفاعل.

الكلوريدات فعالة في تسريع معدل التفاعل لنترات الأمونيوم. عند التحفيز بـ 1% NaCl (ملح الطعام) , وجد أن معدل انحلال نترات الأمونيوم عند 175 مئوية ألف ضعف نترات الأمونيوم النقي. كميات قليلة من الكلوريدات (في وجود حمض حر) يمكن أن تسبب التحلل تحت درجات حرارة تصل إلي 140 مئوية.

الألومونيوم البودرة الذي يضاف إلي نترات الأمونيوم الذائب لا يكون فعالا, و لكن الزنك البودرة يتفاعل بعنف.

عند تسخينه إلي الذوبان فإن نترات الأمونيوم يميل إلي التفاعل طاردا للحرارة مع المواد العضوية, و الذي يظهر أن لها تأثير مُحفز, علي سبيل المثال مع الكربون:



$$2NH_4NO_3 + C \rightarrow 2N_2 + CO_2 + 4H_2O$$

delta H = -75.2 kcal/mole

في ثمانينات القرن التاسع عشر تم اختراع دافعة لمدفع تسمي Ammonpulver استخدم فيها 15% شاركول(كربون في المعظم) مخلوطا بنترات الأمونيوم 85%. هذا الخليط تم ضغطه في حبيبات.

بالرغم من أنه صعب الإشتعال فقد كان أكثر قوة بكثير من البودرة السوداء. هناك عاملين خطيرين حدا من فاعلية هذا الدافع ,الطبيعة الهيجروسكوبية لنترات الأمونيوم, وميل الحبيبات للتصدع نتيجة للتغير في الطور الكريستالي العامل الثاني نتج عنه زيادة الضغط مما ينتج عنه دمار في ماسورة المدفع. تفاصيل التغيرات في الطور للنترات الأمونيوم الكريستالي النقي موضحة في الجدول التالي.

Form	Crystal	Temperature range (C.)	Volume change
Phase V	tetragonal	below -18	V → IV, -3.0%
Phase IV	rhombic	-18 to 32.3	IV → III, + 3.6%
Phase III	rhombic	32.3 to 84.2	III → II, -1.3%
Phase II	tetragonal	84.2 to 125.2	II → I, +2.1%
Phase I	Cubic	125.2 to 169.6	
Liquid	-	above 169.6	

الجدول السابق يوضح الأشكال الكريستالية لنترات الأمونيوم ودرجات الحرارة وما يتعلق بها من تغير الحجم.

التجارب الأولية التي تمت بواسطة الكاتب أثبتت أن نترات الأمونيوم مخلوط فقط ب وقود/حاويات fuel/binders مثالية كالإيبوكسي epoxy و السكروز و البوليستر و البولي يوريثان والسيلكون لن يحتمل الإحتراق بشكل عام, إذا تمت إضافة كمية قليلة من NaCl فإن الإحتراق المستمر سوف يحدث ببطئ شديد وتكون درجة الحرارة المنخفضة الناتجة مائلة إلي إنتاج كميات كبيرة من الرماد الغني بالكربون.

أحد دوافع الصواريخ الناجحة المبنية علي نترات الأمونيوم للهواة معروفة بتركيبة ويكمان تتكون من

نترات أمونيوم مستقرة الحالة, وبودرة الماغنسيوم, وبوليمر PSAN (phase-stabilized AN),

R-45 , تركيب *CP Technologies* له كالآتى :

دافعة ويكمان

PSAN	**60%**
Mg	**20%**
R45HT binder 20%	

مفتاح هذه الدافعة هو إستخدام كمية كبيرة من عامل حراري وهو الماغنسيوم .إحتراق الماغنسيوم طارد للحرارة بدرجة كبيرة ويزودنا بالطاقة الحرارية اللازمة لطرد الماء علي هيئة بخار والتي تتفاعل بعد ذلك مع المعدن بصورة مستمرة.

المراجع(3) و (4) تناقش عدد من تركيبات تجريبية لدوافع الصواريخ والتي تستخدم الماغنسيسوم كمنشط حراري. إدراج السيلكون الأولي بمعدل من 0.4 - 6% تم إقتراحه كمحسن للأداء(6).

العقبات التي تكتنف إستخدام الماغنسيوم في الدوافع تتضمن السلامة والتكلفة العالية للمادة خصوصا إذا تضمنت تكلفة الشحن, وعدم توافرها بكثرة.

بعد تفكير طويل خطر ببالنا عامل حراري بديل وهو الألمونيوم والذي له حرارة تفاعل أكبر بكثير من الماغنسيوم وتمت تجربته ولكن كانت هناك صعوبة في احتراق حبيبات الألمونيوم نتيجة للقشرة الصلبة لأوكسيد الألمونيوم (الألمونيا) والتي تحوي المعدن المؤكسد. المحاولات الأولية لخلط نترات الأمونيوم مع بودرة الألمونيوم مع الحاوية binder كانت بلا نتيجة. حبيبات الألمونيوم لم تحترق بصورة جيدة بسبب حمايتها بواسطة القشرة الخارجية الصلبة للألمونيوم. المرجع(4)يصف محاولات استخدام بودرة الألمونيوم ولكن التركيبات المدروسة فيه فشلت في الاحتراق.

التجارب الأولي التي قام بها المؤلف والمتعلقة بالدوافع المبنية علي KN أشارت إلي صعوبات مماثلة في جعل الألمونيوم يحترق . أُكتُشِفَ أخيرا أن إضافة كمية من الكبريت ساعدت علي إحتراق ذرات الألمونيوم. هذا الأمر أكتشف مبدئيا عندما تم بحث تحضيرات للـ KN ومطاط السيلكون. إضافة من 5-10% من الكبريت سمحت لهذه التحضيرات بالإحتراق بصورة نشطة. تمت ملاحظة ظاهرة مماثلة عندما تمت إضافة دافعة RNX مع الألومونيوم.

هذا المنهج تمت تجربته مع نترات الأمونيوم ومع ذلك كانت النتائج غير ناجحة. بالرغم من ذلك فقد وجد أن الكبريت يساعد علي إشتعال تركيبات نترات الأمونيوم ويمكن أن يقوم أيضا بزيادة فاعلية احتراق الألمونيوم.

العديد من الإضافات ومختلف الحاويات binders تمت تجربتها في محاولات لمساعدة تفاعل الألومونيوم مع نترات الأمونيوم.

البولي ريثان Polyurethane بدا في البداية أنها ذات مستقبل واعد ولكن الاحتراق الفعال لهذا الألمونيوم المعدني العنيد كان مراوغاً . بعد دراسة العشرات من البحوث التقنية عن احتراق نترات الأمونيوم تقرر إستخدام مانحة كلور chlorine donor كـــ NaCl

مبدئيا وبعد ذلك NH_4Cl. النتائج الناتجة عن هذه التجارب كانت أكثر نجاحا, تبين للمؤلف بعد ذلك أن

Spitfire igniter pyrolant

والذي يحتوي علي كمية جيدة من الألمونيوم أحترق بصورة نشطة بشكل إستثنائي لسبب ما.

هذا البيرولانت يستخدم أسمنت لاصق contact cement مبني علي أساس نيو برين كحاوية binder.

من الامثير للإهتمام ان النيو برين هو علامة تجارية للبولي كلورو برين والذي له التركيب الكميائي التالي $[C_4H_5Cl]_n$ ويحتوي علي كمية كبيرة من الكلورين الأولي تقدر ب39%.

التجارب التي تلت استخدمت أسمنت لاصق contact Cement أنتجت ما أُعتبر نتائج ثورية. بالرغم من أنه كان من الصعب بدء الاحتراق فإنه بمجرد الاشتعال فإن هذه التركيبات التجربية اشتعلت بصورة شديدة الثبات بلهب شديد الحرارة ولم يكن هناك أي شرارات بيضاء والتي هي دلالة علي الاحتراق غير الكامل للمعدن.

في الهواء المفتوح فإن شريط الماغنسيوم (أو قضبان بواسطة قطع الماغنسيوم بقاطعة معادن) أثبت أنه فعال في إشعال هذه التركيبات.

مكونات البيرو والتي هي شديدة الاحتراق كالثيرميت وجد انها ايضا فعالة كبادئ للإشتعال Igniter. إذا أشعلت بمشعل بروبين عادي فإن هذه المكونات تحترق بطريقة بطيئة مدخنة غير محدثة للهب (ما يسمي بإحتراق السيجار).

وجد مبكرا جدا في هذه التجارب أن نسبة كبيرة من الألمونيوم ضرورية. إذا لم توجد كمية كافية من الألمونيوم فإن التركيبة الناتجة لا تنتج كمية كافية من الحرارة للمحافظة علي احتراق جيد .هذه التركيبات احترقت بأشد شكل لها بوجود كمية من الألمونيوم تتراوح من 15-25%. ووجد أن أقل كمية يمكن تواجدها من الألومونيوم هي في حدود 10% وهذا يعتمد علي تفصيلات التركيبة .

بالرغم من أن نترات الأمونيوم يعتبر مؤكسد منخفض الطاقة (حرارة الإنفجار فقط من 300 إلي-400 كالوري/جم) إلا أنه عندما يتم استخدام عامل حراري معه كالألمونيوم فإن الأداء النظري يمكن

أن يكون جيدا جدا . مؤشر GUIPEP يشير إلي أن الدفع النوعي لتركيب AN/Al/Neoprene هو في مدي ما بين220-250 ثانية عند ضغط غرفة 1000 psi (باوند لكل بوصة مربعة).

شكل واحد يوضح مقتطفات من نتائج التي أجرتها GUIPEP لتركيب ذو محتوي عالي من الألمونيوم مبني علي نترات الأمونيوم والألمونيوم والنيوبرين (كلوروبرين)

```
Formulation A20          Run using June 1988 Version of PEP,

 CODE                                 WEIGHT    D-H  DENS      COMPOSITION
  134 AMMONIUM NITRATE                64.000  -1090  0.06230    4H   2N   3O
   63 ALUMINUM (PURE CRYSTALINE)      25.000      0  0.09760    1AL
  904 SULPHUR                          3.000      0  0.07300    1S
 1092 CHLOROPRENE (TENTATIVE)          8.000  -2000  0.05540    4C   5H   1CL

****************************CHAMBER RESULTS FOLLOW    ***************************

 T(K)  T(F)  P(ATM)   P(PSI) ENTHALPY ENTROPY  CP/CV    GAS   RT/V
3251. 5393.   68.02  1000.00   -85.76  216.03 1.1353  3.125  21.765


**********PERFORMANCE:  FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE**********

IMPULSE   IS EX     T*      P*      C*     ISP*  OPT-EX  D-ISP     A*M   EX-T
  241.0  1.1389   3040.  39.23  4734.0          10.07  454.1  0.14717  1943.
  244.8  1.0972   3106.  39.81  4886.1   183.1   10.98  461.3  0.15190  2254.
```

شكل 1 مقتطفة من نتائج GUIPEP لتركيبات A20

الأمان في نترات الأمونيوم كمؤكسد للدوافع

كما بينا في المقطع السابق فإن أبحاث المؤلف أشارت إلي أن نترات الأمونيوم لا يمثل أي خطورة غير معقولة كمكون لدوافع الصواريخ وهو في هذا شبيه في مسلكه بمؤكسد شائع الاستخدام في دوافع الهواة ألا وهو نترات البوتاسيوم (Kn) كما أشرنا سابقا فإن نترات الأمونيوم ثابت كيميائيا عند درجة حرارة الغرفة ولا يحترق من تلقاء نفسه وله حساسية قليلة جدا للاحتكاك والصدمات. بالمثل فإن نترات

الأمونيوم غير سام. هناك خاصية واحدة لنترات الأمونيوم تفرقه من المؤكسدات مثل KN. فإن نترات الأمونيوم معروف بقابليته للانفجار إذا توفرت الظروف المناسبة لذلك و بما أن تحرياتنا حول الأمان لن تكون كاملة إلا ببحثنا لهذا الأمر فيجب بحث هذه الخاصية.

التفجير يعرف بأنه تفكك و تحلل فوري (يقاس بالميكروثانية عادة) لكتلة من المادة.

انتشار و توزيع هذه المتحللات يكون بواسطة موجة صدمية يكون لها مستوي كاف من الطاقة.

وبما أننا يجب أن نحاول تفادي التفجر نظرا لآثاره المدمرة. فيجب التأكد ما إذا كان التفجر واردا. خصوصا أن أحد الأشكال من نترات الأمونيوم يستخدم بالفعل في التفجير لقدرته في هذا المجال. ال ANFO و الأمونال و هو نترات الأمونيوم مع مسحوق ألومونيوم هما مثالان علي ذلك. يجب ملاحظة أن نترات الأمونيوم يستخدم عادة كعامل تفجير لأنه ببساطة رخيص و متوافر و آمن في التعامل و النقل و يحتاج لشحنة بادئة قوية.

الكثافة المنخفضة تعتبر عاملا حاسما لتفجير نترات الأمونيوم. فنحتاج إلي أن تكون المادة المتفاعلة ذات طبيعة مثقبة لتزودنا بمراكز التفاعل المطلوبة بينما تمنع الانضغاط نظرا للموجة الصدمية المنتشرة و تقوم بتسخين الجيوب الهوائية بضعة آلاف من الدرجات المئوية . هذا الأمر يولد جبهة تفاعل تزود بالطاقة اللازمة لنشر موجة التفجير . إذا كان هناك نقص في العدد الكافي من الثقوب (bulk density > 1 gram/cc), وهو ما يسمي بالتعبئة الميتة فإن تفجير نترات الأمونيوم يكون مستحيلا.

الحساسية التفجيرية تعتمد علي عدد من العوامل و خصوصا الكثافة الكتلية bulk density بالنسبة للمواد منخفضة الطاقة كنترات الأمونيوم. لذا فبدون وجود الثقوب(الجيوب الهوائية) فإن التفجير لايكون ممكنا.

أحد العوامل الأخري المهمة لتفجير نترات الأمونيوم هو الغلق عليه بإحكام.

بالرغم من عدم قابلية هذا للتطبيق في حالتنا فإن الشكل الذائب من نترات الأمونيوم إذا لم يُهوي بالفقاعات فيمكنه إحتمال صدمة هيدروديناميكية معتبرة دون أن ينفجر. عند مدي حراري بين 169 إلي 190 مئوية و الذي عنده يكون التحلل الحراري لا يذكر فإن نترات الأمونيوم يكون عمليا غير قابل للانفجار .

المرجع(8) يصف تجارب علي خلائط من AN/C/Al, عندما تم بدء إشعالها في مكان محكم الغلق اشتعلت و لكنها لم تنفجر.

أحد المؤكسدات شائعة الاستخدام في دوافع المحترفين و هو الـ .AP يعتبر أكثر قابلية للانفجار من نترات الأمونيوم. الـAP يستخدم أيضا في محركات الصواريخ التجارية عالية القوة و كذلك يستخدم من قبل الكثير من المتحمسين لصواريخ المحركات التجريبية. المرجع رقم (7) يوضح أن أقل قطر حرج* للـAP هو ¼ بوصة بينما هذا الرقم يبلغ بضعة بوصات بالنسبة نترات الأمونيوم في أشد أشكاله حساسية (منخفض الكثافة و مثقب)

* ملحوظة: القطر الحرج هو مقياس لحساسية التفجر و الذي يشير إلي أقل قطر للكتلة المتفجرة و التي يمكنها أن تنفجر دون إحكام الغلق عليها. القطر الحرج الأكبر من 1 بوصة يعتبر غير حساس .

دوافع الـAP بتركيبات مماثلة للتي تمت مناقشتها هنا (أي مع محتوي عال من الألمونيوم) استخدمت و بأمان بالنسبة لاعتبارات التفجر بواسطة HPR ومجتمع الصواريخ التجريبية علي مدار عدة سنوات.

من المثير للاهتمام أن محفزات المركبات الفضائية تستخدم دوافع مبنية علي AP المزود بالألمونيوم (جدول1) وهذا يشبه كثيرا العديد من تركيبات AN/Al التي تم دراستها مع فارق وحيد أنها تستخدم المؤكسد AP والذي هو أكثر حساسية من نترات الأمونيوم.

دوافع محفزات المركبات الفضائية

69.9 % AP

بولي بيوتادين**Polybutadiene 12.04 %**

عامل استشفاء الإيبوكسي**Epoxy curing agent 1.96 %**

مسحوق الألومونيوم **16 %**

أكسيد الحديد الأحمر **0.07 %**

هذه التركيبة يمكن مقارنتها فتقترب من تركييبة A24 مثلا .

الدافعة A24

%68 AN

نيوبرين %11

مسحوق الألومونيوم %17

كبريت %4

بالنظر إلي المقارنة السابقة فإننا نشعر بإن إحتمالية الإنفجار ليست قائمة عند إستخدام نترات الأمونيوم كمؤكسد صلب لدافعة الصواريخ كما تم وصفه في التجارب التي تم إجراؤها في هذا البحث.

وهناك عامل آخر تم ذكره متعلق بسلامة تركيبات نترات الأمونيوم المضغوطة تحت ضغط هيدروليكي

hydraulic pressure. هذه التقنية تستخدم لتكوين ذرات grains الدوافع لإختبار المحرك.

المرجع (3) يصف تصنيع صفائح تستخدم لبحث مقاييس معدل الاحتراق لخليط AN/TNT بواسطة ضغط مسحوقه إلي 0.2 GPa (جيجا باسكال) وهو مايساوي (29000 psi)

نترات الأمونيوم التجريبي / تركيبات الألمونيوم

إلي هذا اليوم تم إختبار 33 تركيبة مختلفة بدرجات مختلفة من التدقيق و الرعاية.

في الحالات الأقل تدقيقا تم إعداد وحرق عينة من التركيبة في الهواء المفتوح لتقدير خصائص احتراقها. وإذا أثبتت هذه العينة أنها ذات خصائص احتراق غير جيدة فلا يتم عمل المزيد من التجارب عليها اما بالنسبة للتركيبات الأكثر واعدية يتم انتاج ذرات grains للدوافع واختبارها في محرك الصاروخ. أما بالنسبة للتركيبات التي تعطي النتائج الأفضل يتم الحصول علي ضغط الغرفة ومنحنيات الاندفاع عن طريق الإطلاق الساكن, لتقدير المقاييس الرئيسية مثلdelivered specific impulse وسمات اللزوجة

characteristic velocity (c*).

التركيبات السابقة استخدمت إما البولي يوريثان أو الإيبوكسي كحاوية binder. وقد أثبتا عدم كفائتهما وذلك للعديد من الأسباب. أما التركيبات فيما بعد فقد استخدمت النيوبرين كحاوية binder والذي ثبتت كفائته.

و يوضح الجدول التالي (جدول 2) قائمة بال 33 تركيبة مع بعض التفاصيل المتعلقة بالأمر.

Date		Formulation percentages								
Mon-Year	Tag	AN	Sulfur	Aluminum	charcoal	NaCl	binder	Binder	Notes	Notebook combustion notes [1]
Jun-04	A 1	65	8	6	2	2	17	PU	2,7	Cool burning. Only occasional flashes indicating aluminum combustion.
Jun-04	A 2	63	8	9	1	2	17	PU	2,7	
Jun-04	A 3	59	8	12	1	2	18	PU	2,7	Cool burning. Occasional sputter.
Jun-04	A 4	59	8	12	1		20	PU	2,7	
Jun-04	A 5	55	10	12	2	2	19	PU	2,7	Cool burning. Occasional sputter.
Jun-04	A 6	50	14	17	2		17	PU	2,7	
Jun-04	A 7	45	14	22	3	1	15	PU	2,7	Ignited well, burned well, lots of heat.
Jun-04	A 8	44	14	21	1	2	18	PU	2,7	
Jun-04	A 9	41	15	24		2	18	PU	2,7	Ignited well, burned extremely hot at flame front, orange gases., little smoke or sound, decent burn rate.
Jun-04	A 10	38	16	26		2	18	PU	2,7	
Jun-04	A 11	49	14	22	0.5	0.5	14	PU	2,7	
Jun-04	A 12	43	14	22	2	1	17.5	epoxy	3,4,6	
Jun-04	A 13	44	14	21	1		19	PU	2,5,6,7	
Nov-05	A 14	41	15	24		2	18	CC	8,9,16	Ignited readily and burned vigorously. v.bright flame, stable.
Mar-05	A 15	48	14	20			18	CC	8,10	Burned similar to A14 but seemingly faster.
May-05	A 16	41	15	24			20	CC	8,11	
May-05	A 17	55		24			21	CC	8	Hard to ignite, but burned very well, hot bright flame.
May-05	A 18	67		25			8	Neo	8	
May-05	A 19	58		25			17	Neo/epoxy	12	Failed to ignite, smouldered well.
May-05	A 20	64	3	25			8	Neo	13,15,16,17,18	Quite hard to ignite, burned v.well & quite fast.
Jun-05	A 21	58		24			18	Neo/PU	14	Hard to ignite. Burned quite poorly with orange glowing flame.
May-07	A 22	54	3	25			18	Neo/PU	14	
May-07	A 23	67	3	20			10	Neo	17,18	
Jul-07	A 24	68	4	17			11	Neo	17,20	Ignition inconsistent (easy or quite hard). Burned hot with white crusty residue.
Jul-07	A 25	70	4	15			11	Neo		
Jul-07	A 26	67		20			10	Neo	17,19,20	Ignited easily. Burned v.well with no aluminum sparklers.
Nov-07	A 27	74	5	11			10	Neo		Harder to ignite, but burned v.well.
Nov-07	A 28	78	5	7			10	Neo		Failed to ignite. Smouldered.
Nov-07	A 29	75	4	12			9	Neo	20	
Nov-07	A 30	68	5	17			10	Neo		
Nov-07	A 31	70		18			12	Neo		
Nov-07	A 32	71		18			11	Neo	17,20	
Dec-07	A 33	68.5		17.5			14	Neo		Hard to ignite (tended to smoulder), but burned well.

Notes:

[1] All samples were ignited using magnesium shavings. Open-air burning.
[2] A1-A9 cured overnight 30C, then in oven at 65C for 1/2 hour. Most PU sample had cracks or bulges.
[3] + 0.5 $MgSO_4$
[4] East Systems, 5:1
[5] + 1.0 KCl
[6] Grain produced for motor. Both motors failed to ignite.
[7] PU was adhesive grade, one-part, moisture cure.
[8] Contact Cement, LePages TiteBond, 21-26% neoprene.
[9] 8 grains produced for motor. One fired with unstable but forceful burn. Two fired well. 2 CATO.
[10] 2 grains produced for motor. One CATO and one fired well.
[11] 2 grains produced for motor. CATOs.
[12] 7% neoprene & 10% epoxy.
[13] Strand burn rate measured, 0.84 mm/sec.
[14] 7% neoprene & 11% PU.
[15] Strand burn rate measured, 3.93 mm/sec.; 2.08 mm/sec.
[16] Sample burned in calorimeter, 7.07 kJ/gram (both).
[17] Grains produced for motor by hydraulic ramming.
[18] Static firing results:
A20-A1: fired well, pressure curve data obtained.
A20-A3: Failed to ignite.
A23-A4: fired well, pressure curve data obtained.
A23-A5: Failed to ignite.
A23-A6: fired well, pressure curve data obtained.
[19] + 3% ammonium chloride
[20] Grains produced for motor. Static firing results:
A26-A1: Motor ignited, then self-extinquished soon after.
A26-A2: Similar to A26-A1.
A24-A2: Similar to A26-A1.
A24-A3: Ignited quickly, pulsed, then thrusted strongly. Pressure curve data not recorded due to blockage
A24-A4: Similar to A26-A1.
A29-A1: Similar to A26-A1.
A24-B1: Fired well. Pressure and thrust curve data obtained.
A32-B1: Slow ignition, lot of sparklers. Pressure and thrust curve data obtained.
CC Contact cement
PU Polyurethane
Neo Neoprene

Date refers to original development date for that formulation.

ترجمة ملاحظات علي الاحتراق (العمود الأخير):

1- احتراق هادئ يوجد فقط بعض الومضات بين الحين و الآخر تشير إلي احتراق الألومونيوم

2- احتراق هادئ مع بعض القرقعات بين الحين و الآخر

3- أشعل جيدا احترق جيدا مع الكثير من الحرارة

4- أُشعل جيدا, احترق بحرارة شديدة عند مقدمة اللهب , غازات برتقالية , القليل من الصوت أو الدخان

5- أشعل سريعا و احترق بشدة مع لهب متوهج بشدة, ثابت

6- احترق مثل السابق و لكن يبدو أسرع

7- صعب الإشعال و لكن يحترق بصورة جيدة للغاية , لهب ساخن ساطع

8- فشل إشعاله , احترق مدخنا بطريقة جيدة

9- صعب الإشعال للغاية , يحترق جيد جدا وبسرعة عالية

10- صعب الإشعال , احترق بصورة سيئة للغاية مع لهب برتقالي ساطع

11- الإشعال متغير (سهل أحيانا و أحيانا صعب للغاية). يحترق بحرارة مع راسب أبيض صلب القشرة

12- أشعل بسهولة . احترق بصورة جيدة للغاية بدون شرارت ألمونيوم

13- أصعب في الإشعال و لكن احترق جيد جدا

14- فشل إشعاله . دخن

15- صعب الإشعال (يميل للتدخين) و لكن يحترق جيدا

ملاحظات :

جميع العينات تم اشعالها باستخدام قضبان الماغنسيوم . الاحتراق في هواء مفتوح

A1-A9 عُرضت طوال الليل لحرارة 30 مئوية , ثم وضعت فى الفرن لنصف ساعة فى حرارة 65 مئوية . معظم عينات الـ PU كانت بها تصدعات أو إنتفاخات

+0.5 MgSO4

نُظُم شرقية , 5:1

+1KCl

ذرة أُنتجت للمحرك , كلا المحركين فشلا فى الاشتعال

PU كان من درجة لاصقة , جزء واحد , معالج للرطوبة .

الأسمنت اللاصق LePages TiteBond , 21-26% نيوبرين .

تم انتاج 8 ذرات للمحرك . تم إطلاق واحدة باحتراق غير ثابت و لكن قوى . أخريتان تم إطلاقهما جيدا . 2 CATO

تم انتاج ذرتان لهذا المحرك . واحدة CATO و الأخرى انطلقت جيدا .

تم انتاج ذرتان للمحرك CATOs .

7% نيوبرين و 10% إيبوكسي

معدل احتراق الـ Strand , 0.84 مم /ثانية .

7% نيوبرين و 11% PU .

معدل احتراق الـ Strand , 3.93 مم/ثانية , 2.08 مم/ ثانية .

تم احراق عينة فى مقياس سعرات , 7. 07 كيلو جول / جم (كلاهما)

تم انتاج الذرات للمحرك بواسطة الكبس الهيدروليكي .

نتائج الإطلاق الساكن static firing:

A20-A1: انطلقت جيدا , تم الحصول على منحنى البيانات

A20-A3: فشلت فى الإشتعال

A23-A4.: انطلقت جيدا , تم الحصول على منحنى البيانات

A23-A5: فشلت فى الإشتعال

A23-A6: انطلقت جيدا , تم الحصول على منحنى البيانات .

+3% كلوريد الأمونيوم

تم انتاج الذرات للمحرك . و كانت نتائج الإطلاق الساكن static firing كالآتى :

A26-A1 : اشتعل المحرك ثم انطفئ ذاتيا بعدها بقليل .

A26-A2 : اشتعل المحرك ثم انطفئ ذاتيا بعدها بقليل .

A24-A2 : اشتعل المحرك ثم انطفئ ذاتيا بعدها بقليل .

A24-A3 : اشتعل بسرعة , نبض , ثم اندفع بقوة . لم يتم تسجيل منحنى بيانات الضغط لحدوث انسداد blockage.

A24-A4 : مثل السابق .

A29-A1 : مثل السابق.

A24-B1 : انطلق جيدا . تم الحصول على منحنى بيانات الضغط و الاندفاعية .

A32-B1 : اشتعال بطئ , الكثير من الشرارات . تم الحصول على منحنى بيانات الضغط و الاندفاعية .

CC أسمنت لاصق Contact Cement cntact cement

PU بولي يوريثان

Neo نيوبرين

التاريخ يشير إلى تارخ التطور الأصلى للتركيبة .

جدول(2)قائمة بتركيبات A بالتفاصيل .

من وجهة النظر العملية , فإن استخدام النيوبرين كحاوية binder يمثل تحديا . فهو ليس مثل الإيبوكسي و الذي هو نظام ثنائي المكونات يعالج المشكلة دون مذيبات , و لكنه ليس متوافرا بهذه الصورة (النظام الثنائي المكونات) . و لكن جميع النيوبرين الذي استخدم في التركيبات التي تم بحثها تم الحصول عليه من الأسمنت اللاصق ذو الدرجة الاستهلاكية العادية . الـ MSDS للأسمنت الاصق الذي استخدم لهذه التجارب يشير فقط إلي المكونات الخطيرة (من وجهة النظر الصحية) و هذه المكونات هي

نفثا مذيبة , أليفاتي خفيف **light aliphatic** 60-30

أكسيد الماغنسيوم 5-1

2-بيوتانون **2-Butanone** 30-10

طولوين 30-10

أما النيوبرين فلا يعتبر خطيرا طبقا لمعايير OSHA لذافلم يشار إليه في الـ MSDS

طبقا للنسب السابقة فإن نسبة النيوبرين تكون ما بين 0-49 % . للحصول علي قيمة أثر فائدة فقد تم أخذ القياسات بوزن عينة من الأسمنت اللاصق ثم السماح للمواد المذيبة الطيارة بالتبخر ثم إعادة وزن العينة مرة أخري . بالنسبة للوعاء الجديد , فقد وجد أن المحتوي 21%. أما الأوعية الناقصة ذرةيا فقد وجد أنها تحتوي علي محتوي أعلي من النيوبرين بحد أقصي 25% بالنسبة للعبوة شبه الفارغة . و هذا ما كان متوقعا لأن المذيب شديد التطاير و يتم فقده علي مدار الوقت , خصوصا مع تكرار فتح الوعاء الحاوي. هذا التحليل بالذات يتجاهل أي شئ آخر غير متطاير مثل أكسيد الماغنسيوم , و لكن يزودنا بقيمة دقيقة كفاية بالنسبة لنوعية التجارب التي نجريها .

كل نترات الأمونيوم الذي استخدم في هذه السلسلة من التجارب هو علي شكل prills و يتم شراؤه من محلات التجزئة علي هيئة عبوات تبريد فوري . المنتج أبيض نقي اللون و لا توجد أي آثار علي وجود شوائب به . من المثير للاهتمام أن تكلف نترات الأمونيوم إقتصادية بدرجة كبيرة . فكل عبوة تبريد تحتوي علي عبوة AN و عبوة ماء منفصلتين تزنان مع بعضهما

250 جم بسعر من 1-2 $ بحسب مكان الشراء.

بودرة الألومونيوم المستخدمة هي من نوعية صبغة الرش atomized pigment و يتم الحصول عليها 420 بالنظام الغربي , و تكلف20 $ للرطل . يمكن الحصول أيضا علي الألومونيوم المناسب من طبقات الألومونيوم الناتجة عن طلاء الألومونيوم . حيث يحتوي طلاء الألومونيوم علي 20-25% ألمونيوم معدني بالنسبة الكتلة .

تحضيرات الذرات grainsالتجريبية

المحاولات الأولي لإنتاج ذرات grains دوافع للإطلاق التجريبي تضمنت استخدام أقل كمية من الأسمنت الاصق كحاوية binder , خلط المكونات جيدا , ثم ضغط المادة الطينية الناتجة في أنابيب تشكيل كرتونية رفيعة , حيث يسمح لها بالجفاف لبضعة أيام في درجة حرترة مرتفعة قليلا . وبما أن هناك كمية لا بأس بها من الأسمنت اللاصق تتكون من مذيبات طيارة . فإن الذرات grainsالناتجة لابد أن يكون بها ثقوب صغيرة للغاية . هذا الأمر يعتبر مثلبا واردا

, إلا أن هذه التقنية تعتبر جيدة علي الأقل بالنسبة للتجارب الأولية . بما أن تركيبات الـAN/AL صعبة الإشعال , فقد تم تصور أنه بالرغم من إمكانية تسرب غازات الاحتراق الساخنة من الثقوب فإنها لن تؤدي لاشتعال المادة المتأثرة بها . و قد أثبتت تجارب المحركات التي تم تحضيرها بهذه الطريقة صحة هذا الافتراض . فقد تم إطلاق محركان اختباريان من هذه بالرغم من الاشعال الصعب و الاحتراق المتعب إلا أن النتائج كانت مشجعة.بالرغم من ذلك فإن هذ الوسيلة لانتاج الذرات grainsتم اسقاطها فيما بعد نظرا للوقت الطويل الذي تستغرقه الذرة grain حتي تجف فقد وجد(بالوزن العادي) أن الوقت اللازم للحصول علي ذرة خالية من المذيبات هو أسابيع.

بعد تجربة العديد من الطرق لتطهير الذرة grain من المذيبات بطريقة فعالة فقد وجد أنه من الأفضل تطهير المادة من المذيبات قبل تشكيلها علي هيئة ذرات grains.

بعد جفافها تماما و الذي يستغرق فقط بضعة ساعات إذا تم التسخين قليلا , فقد وجد أن كسر المادة الجافة إلي حبيبات صغيرة ثم ضغطها ينتج عنه ذرات grainsشديدة الصلابة . هذه الطريقة تم توظيفها منذ ذلك الحين لكل تحضيرات الذرات grainsالتالية . و هذه الطريقة هي كما يلي .

يتم تجفيف الـAN الذي اشتريناه prilled في فرن مسخن مسبقا بحرارة 65-95 مئوية لمدة ساعتين أو أكثر . ثم يتم سحق الـAN بعد ذلك إلي مسحوق ناعم باستخدام ساحق القهوة (عادة 40-50 ثانية لكل 50 جم) . ثم يتم وزن الـAN المجفف و الكبريت و الألومونيوم بدقة , و وضعهم مع بعض في وعاء بلاستيكي محكم Tupperware container . من الممارسات التقليدية لدي مجتمع البيروتيكنيك تجنب خلط النترات مع مسحوق الألومونيوم . و لكن من خبرتي فإن نترات الأمونيوم و الألومونيوم ليس لهم ميل للتفاعل (علي سبيل المثال لا توجد رائحة أمونيا منبعثة علي الإطلاق) . و مع ذلك فإنه يتم اتخاذ احتياطات في هذه التجارب للتأكد من السلامة . مثل تحضير مجموعات صغيرة و تقليل وقت التخزين . من المحتمل بالنسبة للمجموعات الأكبر , بودرة الألومونيوم قد تختلط مع سائل الأسمنت اللاصق عوضا عن نترات الأمونيوم. إضافة كمية صغيرة من حمض البوريك إلي الخليط المسحوق سوف يؤدي أيضا إلي استبعاد امكانية تكوين الـamide ذو الخطورة. من المنظور العملي مع الوضع في الاعتبار صعوبة إشعال مركبات الـANهذه , فنشعر بان احتمالية حدوث احتراق تلقائي خطر هي إمكانية قليلة .

للمساعدة علي خلط مسحوق نترات الأمونيوم مع الألومونيوم يتم إضافة دستة أو أكثر من حجارة أحواض السمك الصغيرة ثم يوضع الجمع في خلاط دوار و يتم الخلط لمدة ساعتين أو أكثر حسب الحجم الذي لدينا .

بعدها يتم وزن كمية الأسمنت اللاصق في سلطانية سهل التخلص منها من البولي ايثيلين . بالنسبة لعبوة الأسمنت اللاصق الجديدة و التي تحتوي علي كتلة نسبيةmass fraction من النيوبرين تقدر بـ0.21 ,

و يتم حساب كمية الأسمنت اللاصق اللازمة

بضرب الكتلة المرادة من النيوبرين في مقلوب الكتلة النسبية

by factoring the required mass of Neoprene by the reciprocal of the mass fraction:

كمية الأسمنت اللاصق = كمية النيوبرين المراد * 4.8 حيث أن 1/ 0.21 =4.8

علي سبل المثال , إذا كانت التركيبة التي يتم تحضيرها تحتاج إلي 4 جم من النيوبرن , فإن كمية الأسمنت اللاصق ستكون 4 * 4.8 = 19.2 جم

ثم يتم إضافة خليط المسحوق المخلوط جيدا الذي لدينا , إلي الأسمنت اللاصق قليلا قليلا . ثم يتم فرد الخليط علي صحفة (صينية) حلوي مغطاة بورق رقاق parchment paper لكي يجف . ثم يتم السماح للمذيب بالتبخر الكامل عن طريق رفع الحرارة قليلا و تركها لمدة 24 ساعة . و تكون النيجة النهائية هي منتج مرن إلي حد ما يمكن تقطيعه إلي قطع صغيرة . ثم يتم حرق عينة من هذه المادة لتقدير كفائة السلوك الاحتراقي لها . و

للإشعال يتم استخدام جزء من شريط من الماغنسيوم أو مجموعة صغيرة من قضبان الماغنسيوم .

الخطوة التالية هي طحن القطع المكسرة إلي شكل حبيبي خشن . و هذا يتم باستخدام طاحنة قهوة كهربائية و منخل مناسب لإقصاء القطع الأكبر التي يمكن ألا تكون قد طحنت كفاية , و التي نطحنها مرة أخري .

يتم وضع الحبيبات بعد ذلك في وعاء محكم الغلق مع dessicant مثل كلوريد الكالسيوم موضوع في قطعة قطن صغيرة small cotton sachel .

الذرات grainsالتي ستستخدم لاختبار المحرك يتم تكوينها بالكبس الهيدروليكي مع القوالب المناسبة . بالنسبة للمحرك ذو الحافظةالملصقة case-bonded motor فإن القالب يكون هو نفسه الحاوية binder . لأنه و نظرا للعدد من الأسباب فإن الحافظةالملصقة case bonding تعتبر تصميم مقبول . التجارب الأولية التى أُجريت أشارت إلى أن عامل المرونة elastic modulus بالنسبة لتركيبات الدوافع المحضرة بهذه الطريقة منخفض كفاية , و قوة التمدد tensile strength له عالية كفاية , هذا الإجهاد للذرة سوف يكون مقبولا للمحركات ذات الأقطار الصغيرة (أقل من 32مم) . الدافعة إما تكبس هيدروليكا مباشرة فى حافظة Casingالمحرك بعد تعبئتها بحبيبات الدافعة, أو أن يتم تشكيل الذرات grainsفى القالب بطريقة هيدروليكية , ثم استخراجها ثم ضغطها فى حافظة Casingالمحرك .

يتم وزن الكمية اللازمة من الحبيبات . و باستخدام ملعقة من ملاعق المائدة يتم حشو القالب بالحبيبات . ي تم ضغط الحبيبات بعد ذلك بوضع mandrel ثم الضرب عليها

برقة بواسطة مطرقة ثقيلة . هذه الخطوات يتم تكرارها حتى الحشو الكامل لحبيبات المادة . ثم يتم استخدام كابس هيدروليكي لكبس المادة تحت ضغط عالي . ويتم حساب كمية القوة اللازمة عن طريق التجربة و الخطأ حتى الحصول علي كثافة الذرة grain المطلوبة . مثاليا فالهدف هو بين 90-95 % من الكثافة النظرية للتركيب المراد . يتم حساب كثافة الذرة grain التي معنا عن طريق وزن القالب قبل وبعد التعبئة للحصول على كتلة الدافعة, و التى تقسم على الحجم الذي تحتله الدافعة. يتم حساب الحجم طبقا لقياسات أبعاد الذرة grain .

ذرات grainsالدوافع المنتجة بالكبس الهيدروليكي يبدو أن لها قوة تحمل في الشد tensile strength جيدة . على الرغم من أنه و إلى اللحظة لم يتم أخذ قياسات لقوة التمدد و لكن يظهر من التجارب السريعة أن الذرات grainsالمكبوسة جيدا بما يقرب من الكثافة المثالية لها مقاومة عالية للتحطم . من المعتقد أن خصائص الإلتصاق للأسمنت اللاصق تلعب دورا هنا . الأسمنت اللاصق يستخدم عادة عن طريق وضع طبقة من الأسمنت على سطحين للصقهما . ثم يترك ليجف و عندما يتم ضغط السطحان مع بعضهما يحدث الإلتصاق الفورى . يعتقد أن آلية مثل تلك تحدث عندما يتم ضغط دافعة تحتوى على النيوبرين . قوة التمدد للنيوبرين عالية حيث تبلغ حوالي 1000 lbs/sq.in .



Figure 2 -- Slugs of A20 formulation.

الإطلاقات الاختبارية الساكنة

هناك العديد من الإطلاقات الساكنة للمحركات و التي تمت باستخدام تركيبات أكثر واعدية . الذرتان الأولتان تم انتاجهما من التركيبات A12 و A13 . و تم استخدام محرك PVC أحادي الاستخدام لكل منهما . كلتا الذرتان كانتا تمتلكان لب دائري تقطعه 4 ثقوب مركزية radial . الذرات grainsالأخيرة كان لها 8 ثقوب 8-slotted pseudo-finocyl .

الهدف كان زيادة المساحة المعرضة للاحتراق و تسهيل اشعال الدوافع صعبة الاشعال . تمت محاولة الإطلاق الساكن static firingفى يونيو 2004 ولكن كلا المحركين فشلا فى الاشتعال على الرغم من الإشعال الناجح للمُشعِلان . كلا المشعلان مُلِئا بحوالى 2جم من أكسيد الحديد / ثيرمايت الألومونيوم مع بادئ سبيتفاير *Spitfire* initiator .

التركيب الآخر الذي تم استخدامه لصنع ذرات grainsالدوافع للإطلاق الساكن كان A14 و الذي كان تم اختباره أولا فى نوفمبر 2004 . تم عمل 8 محركات PVC أحادية الاستخدام 5 منها نجحت فى الاشتعال , 3 منها أدت بشكل واعد . لم يتم أخذ أية قياسات . المحركات الأولى تم تزويدها ب خُطُم nozzles مشكلة من الاسمنت المضغوط هيدروليكيا cast hydraulic-cement . عانت الخُطُم nozzels من تآكل شديد مما أدى لاستخدام الجرافيت . المحركات الأخيرة أظهرت خاصية جديدة غير مرتبطة بالاحتفاظ بالإغلاقات . تم عمل تجعيدات بتسخين حافظة CasingالـPVC عند كل نهاية و استخدام مُشكل مخروطي لتشويه مادة الحافظة Casingالتى تم تليينها .



Figure 3 -- Static firing of A14-A1, May 2005.

This was a single-use PVC motor with hydraulic-cement nozzle.

التركيبات A15,A16 تم أيضا اختبار إطلاقهما عن طريق محركات PVC أحادية الاستخدام . لكل تركيبة من هاتين التركيبتين تم إنتاج جزيئان . 3 من هذه الذرات grains لم تنطلق و واحدة انطلقت جيدا . في هذه المرة أيضا لم يتم أخذ أي قياسات للأداء

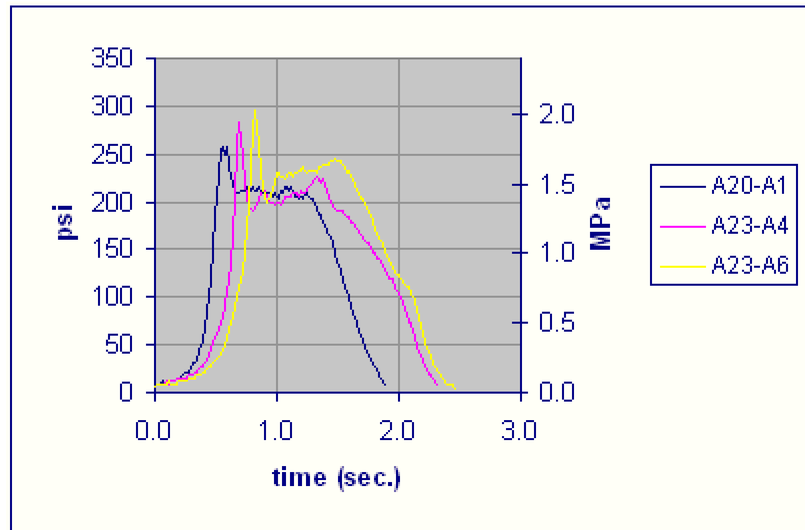


Figure 4 -- PVC motors (left) and aluminum motors (right) used for test firing AN formulation

Aluminum cased 25 mm motors were used for certain formulations starting with A20.

طريقة عمل ذرة الدافعة تم تعديلها ابتدائاً من التركيبة A20 . فبدلا من استخدام حاوية binder رطبة , تم تصنيع الذرات grainsتصنيعا جافا بواسطة الكبس الهيدروليكي كما

وصفنا من قبل . المحركات أيضا اختلفت , فتم استخدام حافظات من الألومونيوم بسمك 1 بوصة (25مم) و فوهات nozzles جرافيتية . كانت النتائج أكثر نجاحا بكثير . التركيبات التي تم إطلاقها بنجاح كبير كانت رقم A20 ,A23, A24 . تم إجراء محاولتين لإطلاق الذرة grain A26 الخالية من الكبريت . في كلتا الحالتان اشتعل المحرك في البداية إلا أنه أُنطفأ ذاتيا فيما بعد . حصلنا علي نتيجة مشابهة لهذا مع التركيبة ذات المحتوي المنخفض من الألومونيوم A29 , أما A 32 فقد تم إطلاقه بنجاح .



Motor	Grain mass		Throat dia.	Throat area	sum pressure	c-star	
	grams	lbs	inches	in^2	psig	ft/sec	m/sec
A20-A1	33.49	0.0738	0.206	0.0333	14278	3455	1053
A23-A4	36.65	0.0808	0.206	0.0333	17073	3776	1151
A23-A6	35.79	0.0789	0.207	0.0337	18384	4204	1281

Figure 5 -- Chamber pressure curves from test firings of July 2007.

تجارب الإطلاقات الساكنة للمحركات الأكبر الـ 1.5 بوصة (38مم) مع ذرة ملتصقة الحافظةcase-bonded grain تم إجراؤها في مايو 2008 حيث تم أخذ قياسات ضغط الغرفة و الاندفاعية . وتم توظيف التركيبة A24 الأكثر واعدية و أيضا التركيبة A32 الخالية

من الكبريت . و تم جمع بيانات جيدة . كان مسلك التركيبة الخالية من الكبريت متواضعا حيث احدثت الكثير من الشرارات البيضاء و التي تدل علي احتراق غير كامل .

هذا الأمر انعكس علي إعطاؤها دفع نوعي (145 sec.) Isp و الذي هو رقم منخفض كما يتضح من المقارنة مع ما أعطته التركيبة A24 و التى أعطت دفع نوعي (196 sec.)Isp .

حدث تآكل للفوهة Nozzle الجرافيتي فى كلا المحركين . حيث تآكل قطر العنق للمحرك A24-B1 من قطر مبدئي (5.9 mm) 0.234 inches إلي 6.2) 0.246 inches mm), و هي زيادة تقدر ب 5% . أما قطر عنق المحرك A32-B1 فقد تآكل من قطر مبدئي (5.9 mm) 0.234 inches إلي

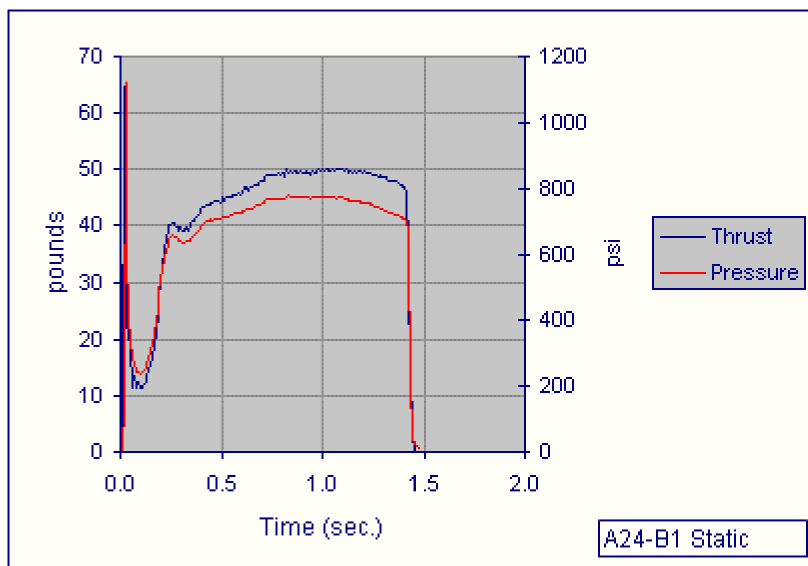
(7.5 mm) 0.297 inches , و هي زيادة بمقدار 27% , تأثير تآكل العنق يظهر فى الرسم البياني الذي يوضح الأداء حيث أنه بتحلل ضغط الغرفة تزداد الدافعية .

المحرك A24-B1 عاني من الاحتراق عبر الغلاف بالقرب من الخطم بعد 1.4 ثانية . الاختبارات التي أُجريت بعد الاطلاق أشارت إلي أن الاحتراق كان نتيجة لأن الفصوص(4 فصوص) لم تكن لها كثافة مناسبة , والفص الأقرب أحترق أولا . نسب الكثافة كانت (بالترتيب من الـ bulkhead إلي الخطم nozzle بدءا من 0.98) 0.98, 0.95, 0.95, 0.92

عندما حدث الاحتراق , فإن انخفاض الضغط المفاجئ تسبب في الإنطفاء الذاتي لباقى الدافع propellent (أنظر شكل 9)



Figure 6 -- Nozzle assemblies and bulkhead for 38 mm motor, A24-B1 and A32-B1 static firings.



Click for metric chart
Click for test data
Figure 7 -- Chamber pressure curves from test firing of May 2008.



Figure 8 -- A24-A3 (Nov.2007) and A24-B1 (May 2008) motor firings.



Figure 9 -- Remains of one grain segment after self-extinquishing (left) Sectioned A24-B1 motor with remaining grain segments

---

الاطلاقات الساكنة نوفمبر 2008

تم صناعة ثلاثة محركات من فئة "A24-B series" , يشبهوا الذين تم اختبار إطلاقهم فى مايو 2008 بغرض محاكاة تركيبة A24 . اختلافات معدل الاحتراق مع ضغط الغرفة يحظي باهتمام خاص . التركيبة A24 تبدو أنها أكثر التركيبات واعدية بناءا على نتائج الإطلاق

الساكن static firingالسابقة . تم عمل ما مجموعه 12 فص جزيئي باستخدام 20 طن من الضغط الهيدروليكي . الذرات grainsالناتجة كل منها كانت تحتوي على ما يقارب 50 جم بكثافة تتراوح بين 97-99 % من الكثافة المثالية . كل محرك حمل 4 فصوص ذرات grainsو التي تم ربطها من نهاياتها بواسطة السيليكون . نهاياتا الذرة grain الناتج تم اغلاقها ثم لصقها بجدران الحافظة Casing. نتيجة لذلك تم تقليل سطح الإحتراق ليشمل اللب فقط , مما أدي لتطور أداء نترات البوتاسيوم Kn . تم إجراء تجارب المحركات الثلاث هذه كما هو موضح في الجدول 3 . تم الإشعال بواسطة 5جم من أكسيد النحاس/ ماغنسيوم الحرارى CuO/Mg thermite موضوع فى شنطة بلاستيكية , تم بدء الكهرباء بواسطة سلك نيكروم nichrome bridge wire .

Designation	Propellant	Propellant mass (g)	Density ratio, avg.	Kn range [1]
A24-B2	A24	196.4	0.980	247-454
A24-B3	A24	191.5	0.978	361-661
A24-B4	A24	193.9	0.980	468-857

[1] Based on initial throat size.

Table 3 -- Motor parameters for the three Nov.22 test firings.

هذا الإطلاق الساكن static firingتم فى الثالث و العشرين من نوفمبر 2008 . بالنسبة للمحرك (A24-B2) فقد كانت له إنطلاقة بطيئة على الرغم من الاشتعال الجيد the thermite igniter firing well . الإطلاق الثانى و كان للمحرك (A24-B3) كان جيدا للغاية , أما الاطلاق الثالث (المحرك الأعلى فى محتواه من الKn) فقد عانى من احتراق الحافظة Casingالألومونيومية للمحرك تجاه نهاية الاحتراق , ولكنه انطلق

جيدا . و قد تم أخذ بيانات جيدة عن الإندفاعية و ضغط الغرفة بالنسبة للتجارب الثلاث . و النتائج موضحة فى جدول 4 .

Test Desig.	Date	Total Impulse	Specific Impulse	c*	c*/c*ideal	Thrust Coefficient	Expansion ratio	Throat diameter	
		(N-sec)	(sec.)	(m/sec.)		average	Initial/Final	Initial/Final (mm)	
A24-B2	Nov.23, 2008	329	171	1226	.90	1.37	4.6/ 4.2	7.19/ 7.52	
A24-B3	Nov.23, 2008	398	212	1387	1.00	1.49	7.0/ 5.9	5.97/ 6.50	
A24-B4	Nov.23, 2008	315*	207	1362	.99	1.49	7.9/ 7.2	5.21/ 5.44	

Table 4 -- Motor performance data for the three Nov.22 test firings.





Figure 10 -- A24 propellant grains for static tests; Firing of A24-B3 motor.

بيانات الأداء بالنسبة للمحرك الأول بالنسبة لـ specific impulse و الـcharateristic velocity (c*) كانت ضعيفة بالنسبة للمحكين الآخرين . و هذ الأمر راجع إلى البداية شديدة البطء للمحرك , بل فى الواقع فقد أوشكت الشحنة المشعلة على الفشل فى إشعال ذرة الدافعة. و هذا الأمر يظهر بوضوح فى الفيديو المرفق (أسفل) . مما لاشك فيه أن المحتوى القليل من الـKn ساهم فى الصعوبات التى اكتنفت المحرك . لذا فقد تم فقد كمية كبيرة من الدافعة خلال المرحلة الأولى من الاحتراق عندما كان المحرك يقوم بتكوين ضغط الغرفة اللازم .

بالنسبة للمحركين A24-B3 and A24-B4 فقد وصلا إلى ضغط الغرفة المطلوب سريعا . و كان الاحتراق ثابتا و جيدا . إلا أنه نظرا للحتراق الذى حدث فى نهاية تجربة المحرك الثالث فقد تم فقد بعض إمكانية الـIsp التى كان من الممكن توليدها لو لم يحدث هذا الاحتراق . و عندما تم فتح المحرك بعد انتهاء التجربة فقد وجدت كمية (38.5 grams) من الدافعة غير محترقة . تم حساب قيمة الـ Isp and c* المبينة هنا بناءا على الكمية الحقيقية من الدافعة المستهلكة .

سوف يُلاحظ من جدول 4 أن النسبة المشار إليها بين الـc* المعطاة و المثالية (اللزوجة المميزة) عالية أكثر من الطبيعي , تساوي اتحاد للإطلاق فى التجربة الثانية . من المستبعد أن هذا يمثل الأداء الواقعي . قيمة الـc* المثالية و التى تم تحديدها بواسطة تحليلات GUIPEP بنيت على قيم غير مؤكدة **tentative** للتركيبة الكيميائية و حرارة التكوين الكلوروبرين heat of formation for chloroprene . و القيم التى تم استخدامها كانت

التركيب الكيميائى	4C 5H 1Cl
حرارة التكوين Heat of formation	2000 calories/gram

Measured thrust & Pressure chart for A24-B3 (US units)
Measured thrust & Pressure chart for A24-B3 (metric units)
Measured trust & Pressure chart for A24-B4 (US units)
Measured trust & Pressure chart for A24-B4 (metric units)
Delivered thrust coefficient for A24-B3
Delivered thrust coefficient for A24-B4

Videoclip of static firing A24-B2 (2.0 Megbyte, wmv file)
Videoclip of static firing A24-B3 (2.2 Megbyte, wmv file)
Videoclip of static firing A24-B4 (1.3 Megbyte, wmv file)

الدافعة المميزة A24

بناءا على النجاح الذي أصاب الإطلاقات الساكنة للمحركات التى تعمل بتركيب A24 , فيمكن إعتبار A24 دافعة صواريخ ناجحة . لذا يمكننا استخدام كلمة دافعة معها بدلا من كلمة تركيبة . نتائج الإطلاقات الساكنة الأخيرة و خاصة A24-B3, تسمح ببعض التشخيص الغير مؤكد tentative characterization للدافعة. معدل الاحتراق كوظيفة لضغط الغرفة تم تحديده لذلك باستخدام الطريقة الموصوفة فى صفحة النت

http://www.nakka-rocketry.net/ptburn.html

نتائج هذه التحليلات موضحة فى شكل 11 (لاحظ أن طريقة التحليل تحتاج استخدام وحدات مترية) .

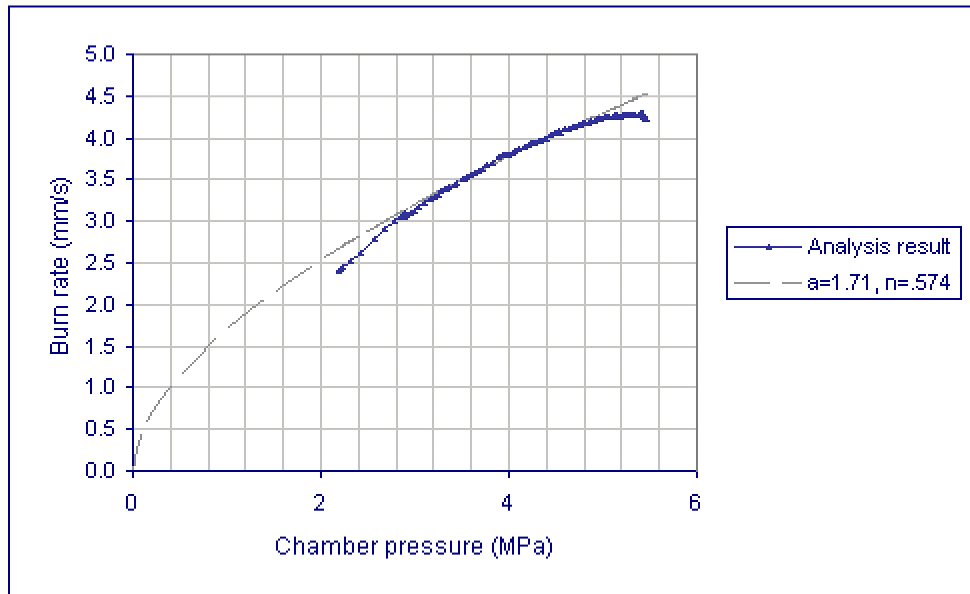


Figure 11 -- Results of burn rate analysis

شكل 11 نتائج تحليلات معدل الاحتراق

فى هذا الشكل يمثل الخط الرمادى المتقطع المناسبة الأفضل لمنحنى سلسلة القوة بالشكل الاعتيادى r = a Pn . فى هذه المعادلة , r هى معدل الاحتراق , a هى معامل coefficient الضغط , n الأُس للضغط . يمكن رؤية أن هذا المنحنى بعيد كل البعد عن كونه منابا تماما , و مع ذلك فإنه يتبع منحنى التحليلات على معظم مدى الضغط . طريقة التحليل تفترض أن الذرة grain يحترق(مباشرة للخارج خلال شبكة الذرة grain) بشكل متناسق تماما . و لكن فى الحقيقة فإن منحنى الضغط المقاس يوضح أن الضغط يميل إلى التسطح باتجاه نهاية الاحتراق مع انخفاض دائرى . هذا الأمر يشير إلى أن شبكة الذرة grain لم تحترق بشكل كامل التناسق . لأسباب تتعلق بتصميم المحرك , فهذه القيم للa و n يمكن اعتبارها دقيقة بما فيه الكفاية . هذا الأمر تم تأكيده بوضع هذه القيم فى SRM.XLS مع خصائص الدافعة كما هو موضح فى جدول 5 و جدول 6 .

Parameter	MPa, mm/sec	PSI, inch/sec
a	1.71	0.00387
n	0.574	0.574

Table 5 -- Burn rate parameters for A24 propellant.

Parameter	units	value	reference
mass density, ideal	gram/cc	1.765	calculated
ratio of specific heat, 2-phase	-	1.05	estimated
ratio of specific heats, mixture	-	1.166	GUIPEP
effective molecular wt, products	kg/kmol	28.8	GUIPEP
combustion temperature	K.	2688	GUIPEP
combustion efficiency	-	0.99	static test
nozzle efficiency	-	0.92	estimated

Table 6 -- Propellant and motor parameters used as input into SRM.XLS motor design software

كما نرى فى شكل 12 , فإن المنحنيات المُتوقعة تتوافق بشكل جيد مع المنحنيات الواقعية لضغط الغرفة و الإندفاعية .

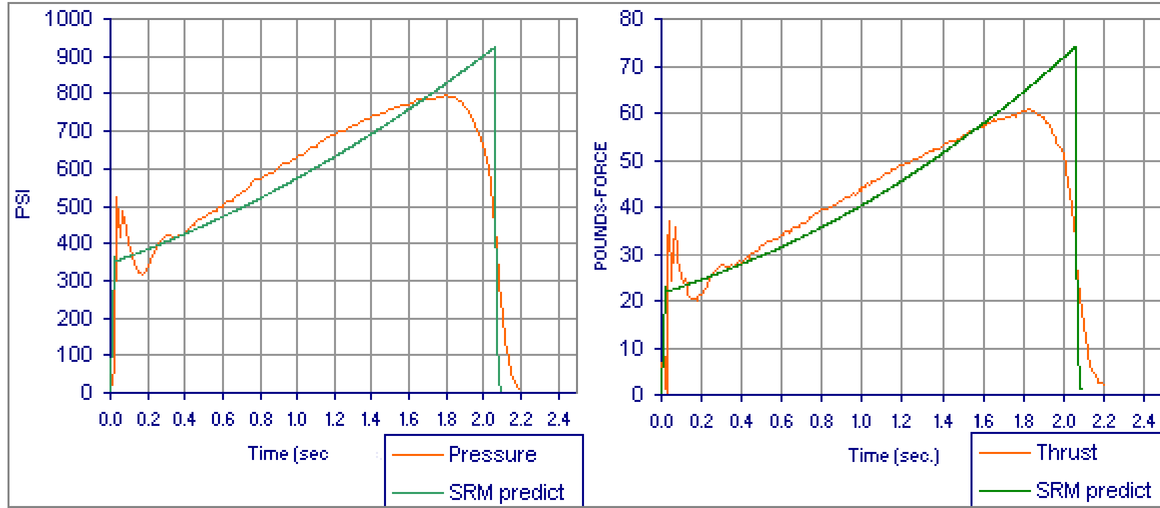


Figure 12 -- Comparison of actual pressure and thrust curves to SRM predictions.

تجارب فى بلغاريا

مبكرا فى هذه السنة , قامت مجموعة من مختبرى الصواريخ بعمل بعض التجارب على تركيبات الA20 ,

Peter Boychev زودنى بالتقرير التالى الذى يصف بعضا من هذه التجارب :

بغرض إقامة تجارب طيران لل A20 تم تجميع محركين PVC متشابهى التركيب . بالنسبة للصواريخ الأقل وزنا و التى تزن حتى 180 جم تم عمل المحرك من أنبوبة PVC , 17 مم فى القطر , 1.5مم فى سمك جدارها . كتلة الدافعة كانت 15 جم . و فى الأعلى تم وضع مركب تأخير بيروتقنى pyrotechnic delay composition مثل الذى فى موديلات محركات الصواريخ . بالنسبة لصاروخنا ال EX تم استخدام أنبوب PVCمقياس 22x1.5 mm . و كانت الافعة تزن 22جم .

بعد انتهاء الأمر تتشوه هذه المحركات بفعل الحرارة , و لكن ذلك لايحدث أثناء الشغل , فال مشكلة فى استخدام أنابيبا PVC . تم عمل الخُطُم nozzels لهذه المحركات عن طريق

الضغط على الساخن hot pressing للجرافيت و الفينوليك رايسين . فقد وُجد أنها ناجحة

وشديدة الثبات ضد التآكل .

Videoclip of rocket launch powered by A20 (2 Megbyte, mpg file).
Videoclip of static firing A20 (1.7 Megbyte, avi file).

Miscellaneous Photos and Videoclips

Videoclip of static firing A24-A3 (1.2 Megbyte, wmv file).
Videoclip of static firing A24-B1 (3.1 Megbyte, wmv file).
Motor used for A20 and A23 static firings, CAD drawing (PDF format)
Rig used for compressing propellant, CAD drawing (PDF format)
Motor used for A24-B1 and A32-B1 static firings, CAD drawing
Mould for pressing A24-B1 and A32-B1 grain segments (4 per motor), CAD drawing (PDF format)
Thermite pellets for initiating combustion
Experimental motors for testing "A" formulations
Internal view of motor showing case-bonded propellant grain
End view showing nozzle retained by snap-ring
End view showing *Bondo-Glass* bulkhead with pressure port
Graphite *c-star* nozzles
Hydraulic ram setup for press-forming grains within motor casing

References

1. A Review of the Global Fertilizer Use by Product, by K.G. Soh , International Fertilizer Industry Association, Paris
2. Nitric Acid and Fertilizer Nitrates, edited by Cornelius Keleti, Marcel Dekker Inc. (Ch.11, Properties of Ammonium Nitrate, K.D.Shah and A.G. Roberts, Imperial Chemical Industries PLC, England)
3. Combustion of Ammonium Nitrate-Based Compositions, Metal-Containing and Water-Impregnated Compounds, B.N. Kondrikov, V.E.Annikov & V.Yu. Egorshev, Journal of Propulsion and Power, Vol.15, No.6. Nov-Dec. 1999
4. U.S. Patent 5,076,868 "High Performance, Low Cost Solid Propellant Compositions Producing Halogen-free Exhaust", Dec.31, 1991.
5. Ammonium Nitrate Decomposition by Heat, A Literature Review, Donald R. Thomas, August 3, 1995.
6. U.S. Patent 5,500,061 "Silicon as high performance fuel additive for Ammonium Nitrate Propellant formulations, March, 1994/1996.
7. Hazards of Chemical Rockets and Propellant Handbook, CPIA Publication No.194 (1972)
8. Shock Initiation Characteristics of Ammonium Nitrate, A.King, A.Bauer, The Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, 1980.
9. Critical Shock Initiation Parameters for Molten Ammonium Nitrate, A.King, A.Bauer, The Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, 1979.
10. The Gasification of Solid Ammonium Nitrate, W.H.Andersen, K.W.Bills, A.O.Dekker,E.Mishuck, G.Moe & R.D.Schultz, Jet Propulsion Journal, Dec.1958.